

## (12) NACH DEM VERTRÄG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
1. April 2004 (01.04.2004)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2004/026670 A2**(51) Internationale Patentklassifikation<sup>7</sup>: **B62D 65/00**

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2003/009915

(22) Internationales Anmeldedatum:  
6. September 2003 (06.09.2003)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
102 42 710.0 13. September 2002 (13.09.2002) DE(71) Anmelder (*für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US*): DAIMLERCHRYSLER AG [DE/DE]; Epplestrasse 225, 70567 Stuttgart (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (*nur für US*): KRAUS, Helmut [DE/DE]; Zeisigweg 2, 71157 Hildrizhausen (DE).

(74) Anwälte: NÄRGER, Ulrike usw.; DaimlerChrysler AG, Intellectual Property Management, IPM-C106, 70546 Stuttgart (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (*national*): JP, US.(84) Bestimmungsstaaten (*regional*): europäisches Patent (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR).

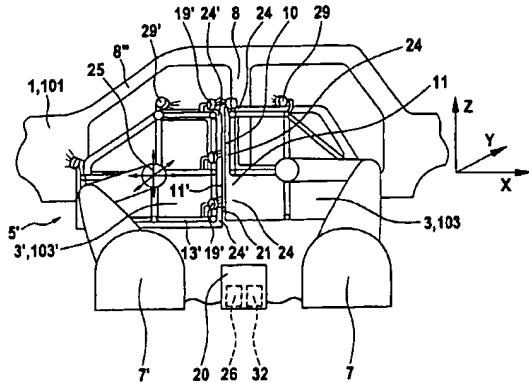
## Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

*[Fortsetzung auf der nächsten Seite]*

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR MOUNTING SEVERAL ADD-ON PARTS ON PRODUCTION PART

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR MONTAGE MEHRERER ANBAUTEILE AN EIN WERKSTÜCK



**A2**  
**WO 2004/026670**

(57) Abstract: The invention relates to a method for the automated mounting of several add-on parts (3, 3') on a production part (1), particularly on a vehicle body, during which the add-on parts (3, 3') should be fastened to the workpiece (1) whereby being aligned in a positionally precise manner with regard to one another. Each add-on part (3, 3') is held in a mounting tool (5, 5') that is guided by a robot (7, 7'). A sensor system (18, 18'), which is connected in a fixed manner to the mounting tool (5, 5') and which is provided with at least one sensor (19, 19'), is fastened to at least one of the mounting tools (5, 5'). An iterative control process (A-2') is used for displacing the mounting tools (5, 5') with the aid of measured values of the sensors (19, 19') into an anticipation position (23, 23') in which the add-on parts (3, 3') that are held inside the mounting tools (5, 5') are aligned in a positionally precise manner with regard to one another. Afterwards, the mounting tools (5, 5'), together with the add-on parts (3, 3'), which are held therein and which are aligned in a positionally precise manner with regard to one another, are guided relative to the production part (1) from the anticipation position (23, 23') and into a mounting position (27, 27') in which they are joined to the production part (1).

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur automatisierten Montage mehrerer Anbauteile (3,3') an ein Werkstück (1), insbesondere an eine Fahrzeugkarosserie, wobei die Anbauteile (3,3') lagegenau zueinander ausgerichtet an dem Werkstück (1) befestigt werden sollen. Jedes Anbauteil (3,3') wird dabei in einem mittels eines Roboters (7,7') geführten

*[Fortsetzung auf der nächsten Seite]*



Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

---

Montagewerkzeug (5,5') gehalten. Auf mindestens einem der Montagewerkzeuge (5,5') ist ein fest mit dem Montagewerkzeug (5,5') verbundenes Sensorsystem (18,18') mit mindestens einem Sensor (19,19') befestigt. Die Montagewerkzeuge (5,5') werden durch einen iterativen Regelvorgang (A-2') unter Zuhilfenahme von Messwerten der Sensoren (19,19') in eine Vorhalteposition (23,23') bewegt, in welcher die in den Montagewerkzeugen (5,5') gehaltenen Anbauteile (3,3') lagegenau zueinander ausgerichtet sind. Anschliessend werden die Montagewerkzeuge (5,5') mit den darin gehaltenen, lagegenau zueinander ausgerichteten Anbauteilen (3,3'), von der Vorhalteposition (23,23') in eine Montageposition (27,27') gegenüber dem Werkstück (1) geführt, in der sie mit dem Werkstück (1) verbunden werden.

Verfahren und Vorrichtung  
zur Montage mehrerer Anbauteile an ein Werkstück

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Montage mehrerer Anbauteile an einem Werkstück, insbesondere an einer Fahrzeugkarosserie, wobei die Anbauteile lagegenau zueinander ausgerichtet an dem Werkstück befestigt werden. Weiterhin betrifft die Erfindung ein Montagesystem zur Durchführung dieses Verfahrens.

An Fahrzeugkarosserien werden im Zuge der Montage an unterschiedlichen Stellen im Außen- und im Innenbereich Anbauteile (z.B. Türen, Heckmodul, Frontmodul, ...) an- bzw. eingebaut. Im Interesse einer qualitativ hochwertigen Anmutung des Fahrzeugs ist es notwendig, diese Anbauteile hochgenau gegenüber benachbarten Bereichen auf der Karosserie bzw. gegenüber anderen (benachbarten) An- und Einbauteilen auszurichten und so zu positionieren, dass ein vorgegebener Übergang zwischen dem Anbauteil und den angrenzenden Karosseriebereichen gewährleistet ist. Hierzu muss das Anbauteil lagegenau gegenüber der Karosserie ausgerichtet und in diesem Zustand mit Hilfe eines Fügeverfahrens - beispielsweise durch Anschrauben - an der Karosserie befestigt werden. Ein solches Verfahren zur hochgenauen Ausrichtung eines Anbauteils gegenüber einem Werkstück ist beispielsweise in der (*PCT-Anmeldung, unsere Akte P803949/WO/1*) beschrieben.

In manchen Anwendungsfällen werden im Rahmen der Montage mehrere (unterschiedliche und zumeist benachbarte) Anbauteile an einem Werkstück befestigt, die nicht nur gegenüber den benachbarten Karosseriebereichen, sondern auch relativ zueinander möglichst genau ausgerichtet sein sollen. Ein Beispiel hierfür ist die Montage von Seitentüren an Fahrzeugkarosse-

rien: Die Fahrertür grenzt im Bereich der B-Säule unmittelbar an die Fondtür an. Um ein hochwertiges Erscheinungsbild des fertigen Fahrzeugs zu erreichen, muss die Lage diese beiden Türen hochgenau zueinander abgestimmt sein. Insbesondere muss ein zwischen Fahrertür und Fondtür gebildeter Spalt möglichst gleichförmig sein; weiterhin müssen die Tiefenmaße der beiden Türen in diesem Bereich möglichst genau übereinstimmen. Daher besteht ein großes Interesse an einem grosserientauglichen, automatisierbaren Verfahren, mit Hilfe dessen diese beiden Türen in einer solchen Weise in die zugehörigen Türausschnitte eingesetzt und befestigt werden können, dass prozesssicher eine hochgenaue Relativausrichtung der beiden Türen gegeben ist.

Der Erfindung liegt somit die Aufgabe zugrunde, ein automatisierbares Verfahren vorzuschlagen, mit Hilfe dessen mehrere Anbauteile - insbesondere zwei benachbarte Fahrzeugtüren - lagegenau zueinander an einem Werkstück - insbesondere an einer Fahrzeugkarosserie - befestigt werden können. Der Erfindung liegt weiterhin die Aufgabe zugrunde, eine zur Durchführung des Verfahrens geeignete Vorrichtung vorzuschlagen.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch die Merkmale der Ansprüche 1 und 6 gelöst.

Danach werden die lagegenau zueinander zu montierenden Anbauteile in einem gemeinsamen Montageprozess am Werkstück befestigt. Die Positionierung und Befestigung der Anbauteile erfolgt mit Hilfe von robotergeführten Montagewerkzeugen, wobei für jedes der beteiligten Anbauteile ein eigenes robotergeführtes Montagewerkzeug vorgesehen ist. Mit Hilfe dieser Montagewerkzeuge werden die gemeinsam zu verbauenden Anbauteile zunächst in einer Vorhalteposition lagegenau zueinander ausgerichtet und dann - unter Beibehaltung dieser lagegenauen Ausrichtung - am Werkstück positioniert und mit diesem verbunden. Zur Ausrichtung der Anbauteile in der Vorhalteposition kommt ein iterativer Regelvorgang zum Einsatz, durch den

das zweite Anbauteil (und evtl. die weiteren Anbauteile) gegenüber dem raumfest gehaltenen ersten Anbauteil so lange verschoben und/oder geschwenkt wird, bis die gewünschte Relativlage der Anbauteile erreicht ist. Der iterative Regelvorgang verwendet Messwerte eines Sensorsystems, das fest mit einem der Montagewerkzeuge verbunden ist und Messwerte ausgewählter Messgrößen auf den Anbauteilen liefert, die für die Beurteilung der Relativlage von besonderer Bedeutung sind. Sollen beispielsweise zwei Anbauteile, die benachbart zueinander in das Werkstück eingebaut werden sollen, bezüglich ihrer aneinander grenzenden Ränder zueinander ausgerichtet werden, so spielen die Spaltmaße entlang dieser Ränder als Messgrößen eine besonders große Rolle.

Der iterative Regelvorgang, durch den die Anbauteile lagegenau zueinander ausgerichtet werden, umfasst vorteilhafterweise die folgenden Prozessschritte:

- es werden (Ist-)Messwerte der Messgrößen erzeugt,
- diese (Ist-)Messwerte werden mit (Soll-)Messwerten verglichen, welche im Rahmen einer (der eigentlichen Arbeitsphase vorausgehenden) sogenannten „Einrichtphase“ erzeugt wurden,
- aus der Differenz zwischen (Ist-)Messwerten und (Soll-)Messwerten wird unter Zuhilfenahme einer im Rahmen der Einrichtphase berechneten sogenannten „Jacobimatrix“ (oder „Sensitivitätsmatrix“) ein Verschiebungsvektor der Montagewerkzeuge berechnet, und
- die Montagewerkzeuge werden um diesen Verschiebungsvektor relativ zueinander verschoben.

Diese Regelschleife wird so lange durchlaufen, bis

- entweder die Abweichung zwischen (Soll-)Messwerten und (Ist-)Messwerten unterhalb vorgegebener Schwellwerte liegt, oder
- die bei aufeinanderfolgenden Iterationsschritten zu erreichende Reduktion dieser Abweichungen unterhalb eines vorgegebenen Schwellen liegt.

Sowohl die (Soll-) Messwerte als auch die Jacobimatrix werden im Rahmen einer - dem eigentlichen Positionier- und Montagevorgang vorgeschalteten - Einrichtphase ermittelt, im Rahmen derer die Montagewerkzeuge auf die konkrete Montageaufgabe eingelernt werden. Diese Einrichtphase wird im Zuge der Einstellung einer neuen Kombination aus Werkzeugen, Sensorsystem, Werkstück und Art und Einbauposition der einzusetzenden Anbauteile einmalig durchlaufen.

Das Verfahren hat den großen Vorteil, dass er unabhängig ist von der genauen Raumlage des Werkstücks und der Anbauteile. insbesondere benötigt der geregelt zu durchlaufende Positionierungsvorgang, im Rahmen dessen die in den Montagewerkzeugen gehaltenen Anbauteile lagegenau zueinander ausgerichtet werden, keinerlei Informationen bezüglich der Absolutpositionen der einzelnen Anbauteile im Arbeitsraum der beteiligten Roboter; das erfindungsgemäße Verfahren beruht ausschließlich auf Relativmessungen, im Rahmen derer eine (in der Einrichtphase hinterlegte) Information - entsprechend einem Satz von (Soll-) Messwerten des Sensorsystems - über den Regelvorgang wiederhergestellt wird. Dies ist mit großen prozessualen und apparativen Vorteilen verbunden:

- Zum einen ist keine interne metrische Kalibrierung der Sensoren notwendig, da die zum Einsatz kommenden Sensoren nicht mehr „messen“, sondern lediglich auf eine monotone Inkrementalbewegung des Roboters mit einer monotonen Änderung ihres Sensorsignals reagieren. Dies bedeutet beispielsweise, dass bei Verwendung einer Fernseh- bzw. CCD-Kamera als Sensor die kamerainternen Linsenverzeichnungen nicht kompensiert werden müssen bzw. dass bei Verwendung eines Triangulationssensors die exakte metrische Berechnung von Abstandswerten entfällt.
- Weiterhin ist keine externe metrische Kalibrierung der Sensoren notwendig. Das bedeutet, dass die Lage der Sensoren nicht metrisch in bezug auf den Arbeitsraum des das Sensorsystem tragenden Roboters bzw. die Koordinatensystem der zugehörigen Roboterhand ermittelt zu werden braucht, um ge-

eignete Korrekturbewegungen berechnen zu können. Die Sensoren müssen lediglich in einer solchen Weise am Montagewerkzeug befestigt werden, dass sie in ihrem Fangbereich überhaupt geeignete Messdaten der Referenzbereiche auf den am Ausrichtprozess beteiligten Anbauteilen erfassen können.

Auf eine Kalibriervorrichtung zur Bestimmung der internen und der externen Kalibration der Sensoren und kann somit vollständig verzichtet werden. Es können also metrisch unkalibrierte Sensoren zum Einsatz kommen, die wesentlich einfacher und somit auch billiger sind als kalibrierte Sensoren. Sowohl der instrumentelle Aufbau als auch die Einrichtung und der Betrieb des Gesamtsystems ist daher sehr kostengünstig realisierbar. Weiterhin wird die Ersteinrichtung und Wartung des Montagesystems drastisch vereinfacht und kann auch von angelentem Personal vorgenommen werden.

Das Ergebnis der Relativpositionierung der Anbauteile zueinander ist weiterhin unabhängig von der absoluten Positionierungsgenauigkeit der verwendeten Roboters, da eventuelle Roboterungenauigkeiten bei dem iterativen Regelprozess, der zum Anfahren der Vorhalteposition durchlaufen wird, ausgeregelt werden. Aufgrund der daraus resultierenden kurzen Fehlerketten ist bei Bedarf eine sehr hohe Wiederholgenauigkeit im Positionierergebnis erzielbar.

Die Anzahl der Positionsfreiheitsgrade, die mit Hilfe dieses Verfahrens bei der Relativpositionierung der Anbauteile kompensiert werden können, ist frei wählbar und hängt nur von der Konfiguration des Sensorsystems ab. Ebenso ist die Anzahl der verwendeten Sensoren frei wählbar. Die Anzahl der bereitgestellten (skalaren) Sensorinformationen muss lediglich gleich oder größer der Anzahl der zu regelnden Freiheitsgrade sein. Insbesondere kann eine größere Zahl von Sensoren vorgesehen werden, und die redundante Sensorinformation kann verwendet werden, z.B. um Formfehler der betrachteten Referenzbereiche auf den Anbauteilen besser erfassen zu können oder

den Positionierungsvorgang in seiner Genauigkeit zu verbessern. Schließlich kann Sensorinformation aus unterschiedlichen berührungsfreien und/oder taktilen Quellen verwendet werden (z.B. eine Kombination von CCD-Kameras, optischen Spaltsensoren und taktilen Abstandssensoren). Somit können durch Verwendung geeigneter Sensoren die Messergebnisse unterschiedlicher qualitätsrelevanter Größen (Spaltmaße, Übergangsmaße, Tiefenmaße) beim Ausrichtprozess der Anbauteile zueinander berücksichtigt werden.

Das Verfahren gestattet einen schnellen Ausgleich von Restunsicherheiten, die bei der Positionierung der Anbauteile zueinander auftreten können; solche Restunsicherheiten können zustande kommen durch Lageabweichungen der zueinander auszurichtenden Anbauteile in den zugehörigen Montagewerkzeugen und/oder durch Formfehler der Anbauteile, welche durch Bauteiltoleranzen bedingt sind.

Ist der Positionierprozess, im Rahmen dessen die Anbauteile in eine gewünschte Relativposition zueinander gebracht werden, abgeschlossen, so werden die auf diese Weise gegenseitig ausgerichteten Anbauteile zu dem Werkstück transportiert und mit diesem verbunden. Um dabei die (in der Vorhalteposition erreichte) hochgenaue Relativ-Ausrichtung der beiden Anbauteile nicht zu verlieren, werden vorteilhafterweise die beiden Roboter, die die Anbauteile tragen, in der Vorhalteposition aneinander angekoppelt; einer der beiden Roboter dient dabei als „Master“-Roboter, dessen Bewegungen der andere, sogenannte „Slave“-Roboter folgt. Bei der Annäherung der Anbauteile an das Werkstück nimmt der „Master“-Roboter daher den „Slave“-Roboter auf seiner Sollbahn mit, so dass der räumliche Bezug der Anbauteile zueinander unverändert bleibt. Ein Steuerungsprinzip, mit Hilfe derer eine solche Kopplung erreicht werden kann, ist beispielsweise bekannt aus der EP 752 633 A1, deren Inhalt hiermit in die vorliegende Anmeldung übernommen wird.

Um - neben der hochgenauen Ausrichtung der Anbauteile relativ zueinander - auch eine hohe Genauigkeit bei der Positionierung und Montage der Anbauteile in das Werkstück zu erreichen, ist es vorteilhaft, auch die Einpassung der (über die Montageroboter aneinander gekoppelten) Anbauteile an das Werkstück im Rahmen eines iterativen Regelvorgangs durchzuführen. In diesem Fall ist ein weiteres Sensorsystem vorgesehen, das fest mit einem der Montagewerkzeuge verbunden ist und Sensoren umfasst, die - bei Annäherung der gekoppelten Anbauteile an das Werkstück - auf ausgewählte Referenzbereiche auf dem Werkstück gerichtet sind. Die seitens dieser Sensoren gelieferten Messwerte werden verwendet, um - analog zu der oben beschriebenen iterativen Ausrichtung der Anbauteile zueinander - eine iterative Ausrichtung der Anbauteile gegenüber dem Werkstück zu erreichen.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind den Unteransprüchen zu entnehmen. Im folgenden wird die Erfindung anhand eines in den Zeichnungen dargestellten Ausführungsbeispiels näher erläutert; dabei zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung ausgewählter Stellungen eines Montagesystems bei der lagegenauen Ausrichtung und Montage zweier Türen in eine Fahrzeugkarosserie

Fig. 1a: Rückzugsposition;

Fig. 1b: Vorhalteposition;

Fig. 1c: Montageposition.

Fig. 2 eine schematische Detailansicht eines Fahrertür-Montagewerkzeugs;

Fig. 3 eine schematische Darstellung der Verfahrbahnen der das Fahrertür-Montagewerkzeug und das Fondtür-Montagewerkzeug tragenden Roboterhände.

Figur 1 zeigt einen Ausschnitt einer Fahrzeugkarosserie 1 mit einem hinteren Türausschnitt 2, in den - im Zuge der Fahrzeugmontage - eine Fondtür 3 montiert werden soll und einem

vorderen Türausschnitt 2', in den eine Fahrertür 3' montiert werden soll. Diese Karosserie 1 ist ein Beispiel für ein Werkstück mit benachbarten Ausschnitten 2,2', in die benachbarte, den Ausschnitten 2,2' bezüglich ihrer Form angepasste Anbauteile 2,2' Lagegenau eingesetzt werden sollen: In Einbaulage der Türen 3,3' grenzt im Bereich der B-Säule 8 der Karosserie 1 die Fondtür 3 mit ihrer in Fahrtrichtung vorderen Kante 10 unmittelbar an und die in Fahrtrichtung hintere Kante 10' der Fahrertür 3' an (siehe Figuren 1b und 1c).

Die Montage der beiden Türe 3,3' in die Karosserie 1 erfolgt mit Hilfe eines (in Figur 1 schematisch dargestellten) automatischen Montagesystems 4 mit einem Arbeitsraum 6. Das Montagesystem 4 umfasst ein von einem Industrieroboter 7 geführtes Montagewerkzeug 5, das die Fondtür 3 zuführt und im Türausschnitt 2 der Karosserie 1 positioniert. Weiterhin umfasst das Montagesystem 4 ein von einem Industrieroboter 7' geführtes Montagesystem 5', das die Fahrertür 3' zuführt und im Türausschnitt 2' der Karosserie 1 positioniert. Zur Lage- und Bewegungssteuerung der Roboter 7,7' und der Werkzeuge 5,5' ist ein Steuersystem 20 vorgesehen. - Analog zum Montagesystem 4 der Figur 1 für die Montage der linken Fondtür 3 und Fahrertür 3' ist (auf der gegenüberliegenden Seite der Karosserie 1) ein weiteres Montagesystem für die rechte Fondtür vorgesehen, dessen Aufbau und Funktionsweise dem des Montagesystems 4 (spiegelbildlich) entspricht.

Um einen qualitativ hochwertigen optischen Eindruck der Karosserie 1 sicherzustellen, müssen die Türen 3,3' Lagegenau (in Bezug auf Position und Winkellage) gegenüber den den Türausschnitten 2,2' benachbarten Bereichen 9 der Karosserie 1 montiert werden; diese Umgebungsbereiche 9 bilden somit einen sogenannten Referenzbereich zur Ausrichtung der Türen 3,3' gegenüber der Karosserie 1. Weiterhin ist es wichtig, die beiden Türen 3 und 3' hochgenau in einer solchen Weise zueinander auszurichten, dass sie im Bereich ihrer benachbarten Kanten 10,10' eine vorgegebene Relativlage einnehmen, insbe-

sondere einen ebenmäßigen Spalt 21 bilden und in bezug auf ihre Lage in Z-(Vertikal-) und Y-(Quer-)Richtung der Karosserie aufeinander abgestimmt sind. Die den Kanten 10,10' benachbarten Bereiche 11,11' auf den Türen 3,3' bilden somit die sogenannten Referenzbereiche zur gegenseitigen Ausrichtung der Türen 3,3'.

Das robotergeführte Montagewerkzeug 5', das zur Positionierung der Fahrertür 3' im Türausschnitt 2' und der anschließenden Montage zum Einsatz kommt, ist schematisch in Figur 2 gezeigt. Dieses an der Hand 12' des Industrieroboters 7' befestigte Montagewerkzeug 5' umfasst einen Rahmen 13', an dem eine Fixiervorrichtung 14' befestigt ist, mit Hilfe derer die Fahrertür 3' in einer wohldefinierten Lage aufgenommen werden kann. Die Aufnahme der Tür 3' durch die Fixiervorrichtung 14' erfolgt an der Innenseite 15' der Tür 3' in unmittelbarer Nachbarschaft von Scharnieraufnahmeflächen 16', an denen im Zuge der Türmontage (in Figur 2 nicht dargestellte) Befestigungsscharniere angeschraubt werden. Durch diese Wahl der Angriffspunkte der Fixiervorrichtung 14' an der Fahrertür 3' wird sichergestellt, dass zwischen den (durch die Scharniere definierten) Anlenkpunkten der Fahrertür 3' in der Karosserie 1 und den Angriffspunkten der Fixiervorrichtung 14' ein minimaler Hebelarm vorliegt, so dass sich die Schwerkraft auf die in der Fixiervorrichtung 14' gehaltene Tür 3' annähernd identisch auswirkt wie auf die fertig eingebaute Tür 3'. Damit wird gewährleistet, dass der beim Türeinbau auftretende Formverzug minimal ist. Die Fixiervorrichtung 14' ist so gestaltet, dass der Bereich der Scharnieraufnahmeflächen 16' auf der Türinnenseite 15' frei zugänglich ist, so dass die Scharniere montiert werden können, während sich die Tür 3' in der Fixiervorrichtung 14' befindet. Durch die in Figur 2 gezeigte Gestaltung der Fixiervorrichtung 14' ist weiterhin sichergestellt, dass die Tür 3' durch das Montagewerkzeug 5' in Einbaulage (d.h. im geschlossenen Zustand) an der Karosserie 1' positioniert werden kann. Die Fixiervorrichtung 14' ist dreh- und/oder schwenkbar gegenüber dem Rahmen 13' des Montagewerk-

zeugs 5' angeordnet, so dass sie nach der Montage durch den Fensterausschnitt 17' der montierten und geschlossenen Tür 3' entfernt werden kann. - Das Montagewerkzeug 5 für die Fondtür 3 ist analog gestaltet.

Zur lagegenauen Ausrichtung der im Montagewerkzeug 5' fixierten Fahrertür 3' gegenüber der im Montagewerkzeug 5 gehaltenen Fondtür 3 ist das Montagewerkzeug 5' mit einem Sensorsystem 18' mit mehreren (in der schematischen Darstellung der Figur 2 drei) Sensoren 19' versehen, die starr mit dem Rahmen 13 des Montagewerkzeugs 5' verbunden sind; sie bilden somit mit dem Montagewerkzeug 5' eine bauliche Einheit. Diese Sensoren 19' dienen zur Ermittlung von Fugen-, Spalt- und Tiefenmaßen zwischen der Vorderkante 10 der Fondtür 3 und der Hinterkante 10' der Fahrertür 3'. Mit Hilfe dieses Sensorsystems 18' wird - wie weiter unten beschrieben - die in dem Montagewerkzeug 5' gehaltene Fahrertür 3' in einem iterativen Regelvorgang gegenüber der Fondtür 3 ausgerichtet.

Soll das Montagesystem 4 auf eine neue Bearbeitungsaufgabe - beispielsweise auf die Türenmontage in einem neuen Fahrzeugtyp - eingestellt werden, so muss zunächst eine sogenannte Einrichphase durchlaufen werden, in der die Montagewerkzeuge 5,5' konfiguriert werden. Dabei wird - entsprechend der zu montierenden Fahrertür 3' - eine angepasste Fixiervorrichtung 14', ein geeignet gestalteter Rahmen 13' und ein Sensorsystem 18' mit den entsprechenden Sensoren 19' ausgewählt und gemeinsam zu dem Montagewerkzeug 5' konfiguriert. Weiterhin wird aus einer Fixiervorrichtung 14 und einem Rahmen 13 eine Montagevorrichtung 5 für die Fondtür 3 konfiguriert. Im Anschluss daran wird das Sensorsystem 18' des Montagewerkzeugs 5' „eingelernt“, indem - wie im folgenden unter I. beschrieben - (Soll-) Messwerte des Sensorsystems 18' auf einer „Master“-Fondtür 103 und einer „Master“-Fahrertür 103' aufgenommen werden. Weiterhin werden in einer zweiten Einlernphase - wie im folgenden unter II. beschrieben - die beiden zueinander ausgerichteten „Master“-Türen 103,103' auf eine „Master“-

Karosserie 101 eingelernt und die gesteuert zu durchlaufenden Bahnabschnitte der Verfahrbahnen der Roboter 7,7' einprogrammiert. Nach Beendigung dieser Einrichtphasen I,II steht das so konfigurierte und eingemessene Montagesystem 4 zum Serieneinsatz bereit, bei dem für jede dem Arbeitsraum 6 der Roboter 7,7' zugeführte Karosserie 1 eine sogenannte Arbeitsphase durchlaufen wird, bei der - wie im folgenden unter III. beschrieben - zwei zugehörige Türen 3,3' zunächst lagegenau zueinander ausgerichtet werden und anschließend gemeinsam in den Türausschnitt 2 transportiert, dort positioniert und befestigt werden.

I. Einrichtphase des Montagewerkzeugs 5' gegenüber dem benachbarten Anbauteil (d.h. gegenüber der Fondtür 103):

Zur Lösung einer neu gestellten Montageaufgabe wird in einem ersten Schritt zunächst das wie oben beschrieben konfigurierte Fondtür-Montagewerkzeug 5 an der Roboterhand 12 befestigt und mit einer („Master“-)Fondtür 103 bestückt. Das Montagewerkzeug 5 wird dann mit Hilfe des Roboters 7 in eine frei wählbare, außerhalb des eigentlichen Montagebereichs 122 auf der Karosserie 101 befindliche, sogenannte Fondtür-Vorhalteposition 23 bewegt; in dieser Stellung wird das Montagewerkzeug 5 während der Einrichtphase stationär gehalten.

Weiterhin wird ein der Montageaufgabe angepasste Sensorsystem 18' ausgewählt und gemeinsam mit der Fixiervorrichtung 14' zum Montagewerkzeug 5' konfiguriert, das seinerseits an der Roboterhand 12' befestigt wird. Die Fixiervorrichtung 14' wird mit einer („Master“-)Fahrertür 103' bestückt und (manuell bzw. interaktiv) in einer solchen Weise gegenüber der in Fondtür-Vorhalteposition 23 befindlichen („Master“-)Fondtür 103 ausgerichtet, dass eine „optimale“ Ausrichtung der beiden Türen 103,103' zueinander gegeben ist (siehe Figur 1b). Diese „optimale“ Ausrichtung ist im vorliegenden Fall dadurch definiert, dass der Spalt 21 zwischen den beiden Türen 103,103'

möglichst gleichförmig ist, dass zwischen den beiden Kanten 10,10' in Fahrzeugquerrichtung (Y-Richtung) kein Tiefenversatz vorliegt und dass die Referenzbereiche 11,11' der beiden Türen 103,103' in Z-Richtung miteinander fluchten. Die dabei eingenommene Relativposition des Montagewerkzeugs 5' gegenüber dem Montagewerkzeug 5 wird im folgenden als Fahrertür-Vorhalteposition 23' bezeichnet.

Die Zahl und die Lage der Sensoren 19' auf dem Rahmen 13' des Montagewerkzeugs 5' ist so gewählt, dass die Sensoren 19' auf geeignete, für die „optimale“ Ausrichtung besonders wichtige, Bereiche 24' auf der („Master“-)Fahrertür 103' bzw. Bereiche 24 der („Master“-)Fondtür 103 gerichtet sind. Im Ausführungsbeispiel der Figuren 2, 1b werden drei Sensoren 19' verwendet werden, die auf die in Figur 1 gezeigten Bereiche 24,24' gerichtet sind, so dass die Sensoren 19' Spaltmessungen im oberen, mittleren und unteren Bereich der gegenüberliegenden Kanten 10,10' der beiden („Master“-)Türen 103,103' durchführen. Die Zahl der Einzelsensoren 19' sowie die Umgebungen 24,24', auf die sie ausgerichtet sind, werden in einer solchen Weise ausgewählt, dass sie eine bestmögliche Charakterisierung der für den jeweiligen Anwendungsfall relevanten Qualitätsmerkmale gestatten. Neben den Spaltmessungssensoren 19' können weitere Sensoren vorgesehen sein, die beispielsweise einen (Tiefen-)Abstand zwischen den beiden („Master“-)Türen 103,103' messen.

Das Montagewerkzeug 5' mit dem Sensorsystem 18' und mit der in der Fixiervorrichtung 14' gehaltenen („Master“-)Fahrertür 103' wird nun mit Hilfe des Roboters 7' auf die (durch das manuell bzw. interaktiv Ausrichten eingestellte, in der Darstellung der Figur 1b eingenommene) Fahrertür-Vorhalteposition 23 gegenüber der stationär gehaltenen („Master“-)Fondtür 103 „eingelernt“. Hierbei werden zunächst Messwerte aller Sensoren 19' in der Fahrertür-Vorhalteposition 23' aufgenommen und als „Soll-Messwerte“ in einer Auswerteeinheit 26 des Sensorsystems 18' abgelegt; diese Sensor-Auswerteeinheit

26 ist zweckmäßigerweise in das Steuersystem 20 der Roboter 7,7' integriert. Anschließend wird - ausgehend von der Fahrertür-Vorhalteposition 23' - mit Hilfe des Roboters 7' die Lage des Montagewerkzeugs 5' und der darin gehaltenen („Master“-)Fahrertür 103' gegenüber der („Master“-)Fondtür 103 entlang bekannter Verfahrbahnen - wie in Figur 1b durch Pfeile 25 angedeutet - systematisch verändert; in der Regel sind dies Inkrementalbewegungen des Roboters 7' in seinen Freiheitsgraden. Die dabei auftretenden Veränderungen der Messwerte der Sensoren 19' werden (vollständig oder in Teilen) aufgezeichnet. Aus diesen Sensorinformationen wird - in bekannter Weise - eine sogenannte Jacobimatrix (Sensitivitätsmatrix) errechnet, die den Zusammenhang zwischen den Inkrementalbewegungen des Roboters 7' und den dabei auftretenden Änderungen der Sensormesswerte beschreibt. Das Verfahren zur Ermittlung der Jacobimatrix ist beispielsweise beschrieben in „A tutorial on visual servo control“ von S. Hutchinson, G. Hager und P. Corke, IEEE Transactions on Robotics and Automation 12(5), Oktober 1996, Seiten 651–670. In diesem Artikel sind auch die Anforderungen an die Verfahrwege bzw. die Messumgebungen beschrieben (Stetigkeit, Monotonie, ...), die erfüllt sein müssen, um eine gültige Jacobimatrix zu erhalten. – Die Inkrementalbewegungen sind in einer solchen Weise ausgewählt, dass während dieses Einrichtvorgangs keine Kollisionen des Montagewerkzeugs 5' bzw. der („Master“-)Fahrertür 103' mit der stationär gehaltenen („Master“-)Fondtür 103 auftreten können.

Die in der Einrichtphase erzeugte Jacobimatrix wird zusammen mit den „Soll-Messwerten“ in der Auswerteeinheit 26 des Sensorsystems 18' abgelegt und bilden die Grundlage für den späteren Positionier-Regelvorgang A-2' in der Arbeitsphase (siehe unten unter III.).

II. Einrichtphase des Montagewerkzeugs 5' gegenüber dem Werkstück (d.h. gegenüber der Karosserie 1):

In einem nächsten Schritt werden die beiden Montagewerkzeuge 5,5' unter Zuhilfenahme der Roboter 7,7' (manuell oder interaktiv) zu einer im Arbeitsraum 6 des Montagesystems 4 befindlichen („Master“-)Karosserie 101 hinbewegt. Dabei wird die der Vorhalteposition 23,23' entsprechende Relativlage der beiden („Master“-)Türen 103,103' (d.h. die im Prozessschritt I. manuell eingestellten, gewünschten Relativausrichtung der beiden Türen 103,103') beibehalten.

Analog zum oben beschriebenen Einlernen der Vorhalteposition 23' des Montagewerkzeugs 5' gegenüber dem (stationär in der Vorhalteposition 23 gehaltenen) Montagewerkzeug 5 wird nun das gekoppelte System der beiden Montagewerkzeuge 5,5' gegenüber der („Master“-)Karosserie 101 eingelernt. Hierzu werden die beiden Türen 103,103', die in den (zueinander ausgerichteten) Montagewerkzeugen 5,5' gehalten sind, mit Hilfe der Roboter 7,7' (manuell oder interaktiv) in der gewünschten („optimalen“) Lage und Ausrichtung in den Türausschnitt 102,102' der („Master“-) Karosserie 101 positioniert. Die dabei eingenommene Relativposition des Türenpaars 103,103' gegenüber der („Master“-) Karosserie 101 wird im folgenden „Montageposition“ 27 genannt und entspricht derjenigen Relativausrichtung des Türenpaars 103,103' zur Karosserie 101, in der die beiden Türen in der Karosserie 101 befestigt werden sollen.

Zum Einlernen der Montageposition 27 wird ein weiteres Sensorsystem 28' (mit Sensoren 29') verwendet, das ebenfalls fest mit dem Montagesystem 5' verbunden ist. Hierbei können einige (oder alle) der Sensoren 18' des Sensorsystems 19' auch als Sensoren 29' des Sensorsystems 28' zum Einsatz kommen. Die Sensoren 29' sind in einer solchen Weise am Montagewerkzeug 5' befestigt, dass sie auf die ausgewählten Referenzbereiche 9 auf der („Master“-)Karosserie 101 und/oder auf

ausgewählte Referenzbereiche 30' der („Master“-)Fahrertür 103' gerichtet sind. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel umfasst das Sensorsystem 28' vier Sensoren 29', von denen zwei auf einen Karosseriebereich 9 im Bereich der A-Säule 8" gerichtet sind, ein weiterer Sensor 19', der bereits zur Relativausrichtung der beiden Türen 103,103' im Zuge der Phase I zum Einsatz kam, auf den oberen Bereiche der B-Säule 8 gerichtet ist. Die Sensoren 29' sind vorteilhafterweise (optische) Spaltsensoren, die die Breite des Spaltes 31' zwischen der Fahrertür 103' und der Karosserie 101 im jeweiligen Sichtbereich messen.

Die robotertechnisch aneinandergekoppelten Montagewerkzeuge 5,5' mit dem Sensorsystem 28' werden nun mit Hilfe der gekoppelt bewegten Roboter 7,7' auf die (manuell bzw. interaktiv eingestellte) Montageposition 27,27' des („Master“-)Türenpaars 103,103' gegenüber der („Master“-)Karosserie 101 „eingelernt“. Dieses iterative Einlernen erfolgt analog zu dem unter I. beschriebenen Einlernvorgang des Montagewerkzeugs 5', bei dem das Montagewerkzeug 5' mit der („Master“-)Fahrertür 103' auf die (Fahrertür-)Vorhalteposition 23' gegenüber der stationär gehaltenen („Master“-)Fondtür 103 eingelernt wurde: Es werden zunächst - während die beiden Montagewerkzeuge 5,5' in der Montageposition 27,27' befindet - mit Hilfe des Sensorsystems 28 Messwerte der Referenzbereiche 9,30' auf der („Master“-)Karosserie 101 und/oder der („Master“-)Fahrertür 103' aufgenommen und als „Soll-Messwerte“ in einer zum Sensorsystem 28 gehörigen Auswerteeinheit 32 abgelegt, die in das Steuersystem 20 der Roboter 7,7' integriert ist. Anschließend wird - ausgehend von dieser Montageposition 27,27' - mit Hilfe der gekoppelten Roboter 7,7' synchron zueinander die Lage der zueinander ausgerichteten („Master“-)Türen 103,103' gegenüber der („Master“-)Karosserie 101 entlang bekannter Verfahrbahnen systematisch verändert (Pfeile 25"). Aus den damit verbundenen Veränderungen der Messwerte der Sensoren 29' wird die Jacobimatrix (Sensitivitätsmatrix) der gekoppelten Montagewerkzeuge 5,5' errechnet, die den Zu-

sammenhang zwischen den Inkrementalbewegungen der gekoppelten Roboter 7,7' und den dabei auftretenden Änderungen der Messwerte der Sensoren 29' beschreibt. Die Inkrementalbewegungen sind in einer solchen Weise ausgewählt, dass während dieses Einrichtvorgangs keine Kollisionen der Türen 103,103' bzw. der Werkzeuge 5,5' mit der („Master“-) Karosserie 101 auftreten können. Die erzeugte Jacobimatrix wird zusammen mit den „Soll-Messwerten“ in der Auswerteeinheit 32 des Sensorsystems 28' abgelegt und bildet die Grundlage für den späteren Regelvorgang in der Positionierphase C,C' der gekoppelten Werkzeuge 5,5' gegenüber der Karosserie 1 (siehe unten unter III.).

Zusätzlich zum Einlernen der Montageposition 27,27' werden in dieser Einrichtphase Verfahrbahnen 33,33' der Roboter 7,7' erzeugt, die schematisch in Figur 3 dargestellt sind. Den Ausgangspunkt der Verfahrbahnen 33,33' der beiden Roboter 7,7' bildet jeweils eine sogenannte „Rückzugsposition“ 34,34', die so gewählt ist, dass eine neue Karosserie 1 in den Arbeitsraum 6 der Roboter 7,7' eingeführt werden kann, ohne dass Kollisionen der Karosserie 1 mit den Montagewerkzeugen 5,5' auftreten können. Diese Rückzugspositionen 34,34' können beispielsweise unterschiedlichen (in den Figuren nicht dargestellten) Bestückungsstationen entsprechen, in der die Montagewerkzeuge 5,5' (manuell) mit den zu verbauenden Türen 3,3' bestückt werden. Alternativ können die Rückzugspositionen 34,34' Entnahmestationen entsprechen, in denen die Montagewerkzeuge 5,5' die zu verbauenden Türen 3,3' (automatisch) aus Werkstückträgern entnehmen.

Ausgehend von dieser Rückzugsposition 34,34' umfassen die Verfahrbahnen 33,33' der beiden Montagewerkzeuge 5,5' folgende separate Abschnitte:

- A-1 Das Fondtür-Montagewerkzeug 5 mit eingelegter Fondtür 3 wird auf einer gesteuert zu durchlaufenden Bahn A-1 von der Rückzugsposition 34 in die Fondtür-Vorhalteposition 23 gebracht.

- A-1' Gleichzeitig bzw. danach wird das Fahrertür-Montagewerkzeug 5' mit eingelegter Fahrertür 3' auf einer gesteuert zu durchlaufenden Bahn A-1' von der Rückzugsposition 34' in eine sogenannte „Ausrichtposition“ 35' gebracht, die so gewählt ist, dass alle Einzelsensoren 19' des Sensorsystems 18' gültige Messwerte der jeweiligen Bereiche 24,24' der Fondtür 3' und/oder der Fahrertür 3 erfassen können, während gleichzeitig gewährleistet ist, dass keine gegenseitigen Kollisionen der Montagewerkzeuge 5,5' oder der darin gehaltenen Türen 3,3' auftreten können.
- A-2' Das Fahrertür-Montagewerkzeug 5' mit eingelegter Fahrertür 3' wird auf einer geregelt zu durchlaufenden Bahn A-2' von der Ausrichtposition 35' in die (wie oben beschrieben „eingelernte“) Fahrertür-Vorhalteposition 23' gebracht, in der die im Montagewerkzeug 5' gehalte-ne Fahrertür 3' lage- und winkelgenau gegenüber der im Montagewerkzeug 5 gehaltenen Fondtür 3 ausgerichtet ist. Was während dieses geregelt zu durchlaufenden Prozessschritts im einzelnen geschieht, wird weiter unten (in III. Arbeitsphase) beschrieben.
- B,B' Anschließend wird der Fondtür-Roboter 7 an den Fahrer-tür-Roboter 7' angekoppelt, und die beiden Roboter 7,7' werden auf einer gesteuert zu durchlaufenden Bahn B bzw. B' von der Vorhalteposition 23,23' in eine Näherungposition 36,36' gegenüber der Karosserie 1 bewegt. Die Näherungsposition ist so gewählt, dass alle Einzel-sensoren 29' des Sensorsystems 28' gültige Messwerte der (für die Türeinpassung relevanten) Referenzbereiche 9,30,30' auf der Karosserie 1 und den Türen 3,3' liefern, während gleichzeitig sichergestellt ist, dass keine Kollisionen der Montagewerkzeuge 5,5' oder der darin gehaltenen Türen 3,3' mit der Karosserie 1 auf-treten können.
- C,C' Die Montagewerkzeuge 5,5' werden von den gekoppelten Robotern 7,7' auf einer geregelt zu durchlaufenden Bahn C bzw. C' von der Näherungsposition 36,36' in die (wie

oben beschrieben „eingelernte“) Montageposition 27,27' gebracht, in der die beiden Türen 3,3' (ohne Verlust der in Prozessschritt A-2' erzielten hochgenauen Relativausrichtung der Türen 3,3') winkel- und abstandsgetreu gegenüber dem Türausschnitten 2,2' der Karosserie 1 ausgerichtet sind. Nun werden die beiden Türen 3,3' in ihrer Montageposition 27,27' an die Türausschnitte 2,2' der Karosserie 1 montiert.

- D,D' Die Fixiervorrichtungen 14,14' der Montagewerkzeuge 5,5' werden gelöst, wodurch die Türen 3,3' freigegeben werden. Anschließend wird die Kopplung der beiden Roboter 7,7' aufgehoben, und beide Montagewerkzeuge 5,5' werden (unabhängig voneinander) robotergesteuert in ihre jeweiligen Rückzugspositionen 34,34' zurückbewegt.

Die im Rahmen dieser Einrichphase erzeugten Verfahrbahnen 46,46' der beiden Montagewerkzeuge 5,5' (bzw. der zugehörigen Roboter 7,7') besteht somit aus den gesteuert zu durchlaufenden Abschnitten A-1, A-1', B/B' und D/D' sowie den geregt zu durchlaufenden Abschnitten A-2' und C/C'.

### III. Arbeitsphase

In der Arbeitsphase werden dem Arbeitsraum 6 des Montagesystems 4 sequentiell Karosserien 1 zugeführt und eingespannt, und für jede Karosserie 1 werden die in der Einrichphase II. generierten Verfahrbahnen 33,33' der Roboter 7,7' bzw. der Montagewerkzeuge 5,5' durchlaufen.

#### Verfahrbahn-Abschnitte A-1 und A-1':

Während des Zuführens der neuen Karosserie 1 befinden sich die beiden Montagewerkzeuge 5,5' in den Rückzugspositionen 34,34' und sind bzw. werden mit der zu montierenden Fondtür 3 und der zu montierenden Fahrertür 3' bestückt (siehe Fig.

1a). Ausgehend von der Rückzugsposition 34,34' wird das Fondtür-Montagewerkzeug 5 mit eingelegter Fondtür 3 in die Fondtür-Vorhalteposition 23 gebracht, während das Fahrertür-Montagewerkzeug 5' mit eingelegter Fahrertür 3' in die Ausrichtposition 35' transportiert wird.

Verfahrbahn-Abschnitt A-2' (Ausrichtphase des Fahrertür-Montagewerkzeugs 5'):

Ausgehend von der Ausrichtposition 35' wird eine Positionierphase des Montagewerkzeugs 5' (Bahnabschnitt A-2' in Figur 3) durchlaufen, im Rahmen derer die im Montagewerkzeug 5' gehaltene Fahrertür 3' in die (während der Einlernphase eingelerte) Vorhalteposition 23' gegenüber der stationär in der Vorhalteposition 23 gehaltenen Fondtür 3 gebracht und dabei exakt gegenüber der Fondtür 3 ausgerichtet wird. Hierzu werden durch die Sensoren 19' des Sensorsystems 18' Messwerte in ausgewählten Bereichen 11,11' der Fondtür 3 und der Fahrertür 3' aufgenommen. Mit Hilfe dieser Messwerte und der in der Einrichtphase bestimmten Jacobimatrix wird ein Bewegungsinkrement (Verschiebungsvektor) berechnet, das die Differenz zwischen den aktuellen (Ist-) Sensormesswerten und den (Soll-) Sensormesswerten verkleinert. Die im Montagewerkzeug 5' gehaltene Fahrertür 3' wird dann mit Hilfe des Roboters 7' um dieses Bewegungsinkrement verschoben und/oder geschwenkt, und während der laufenden Bewegung werden neue (Ist-) Sensormesswerte aufgenommen.

Dieser iterative Mess- und Verschiebe-Vorgang wird in einer Regelschleife so lange wiederholt, bis die Differenz zwischen den aktuellen (Ist-) und den angestrebten (Soll-) Sensormesswerten ein vorgegebenes Fehlermaß unterschreitet, oder bis sich diese Differenz nicht mehr über einen im Vorfeld festgesetzten Schwellenwert hinaus ändert. Die Fahrertür 3' befindet sich nun (im Rahmen der durch Fehlermaß bzw. Schwellen-

wert vorgegebenen Genauigkeit) in der (in Figur 1b dargestellten) Vorhalteposition 23' gegenüber der Fondtür 3.

Durch die in dieser Positionierphase A-2' durchlaufene iterative Minimierung werden sowohl Ungenauigkeiten der beiden Türen 3,3' bezüglich ihrer Lage und Ausrichtung in den Fixierzvorrichtungen 14,14' der Montagewerkzeuge 5,5' als auch eventuell vorhandene Formfehler dieser Türen 3,3' (d.h. Abweichungen von den („Master“-)Türen 103,103') kompensiert. Die Fahrertür 3' wird also im Zuge dieses iterativen Regelprozesses - unabhängig von Form- und Lageungenauigkeiten - in der „optimalen“ gegenüber der Fondtür 3 ausgerichtet. Zur separaten Erkennung und Bewertung von Formfehlern auf Fondtür 3 und Fahrertür 3' können auf dem Montagewerkzeug 5' zusätzliche Sensoren vorgesehen werden, deren Messwerte ausschließlich oder teilweise zur Erfassung der Formfehler verwendet werden. Weiterhin können die Messwerte der Einzelsensoren 19' mit unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren versehen werden, um eine gewichtete Lageoptimierung der Fahrertür 3' gegenüber der Fondtür 3 herbeizuführen.

Eine wichtige Eigenschaft dieser Positionierphase A-2' ist ihre Unabhängigkeit von den Genauigkeiten der Roboter 7,7': Da der Positionierungsvorgang auf einem iterativen Vergleich der (Ist-) Messwerte mit (Soll-) Messwerten beruht, wird jede Positionsungenauigkeit der Roboter 7,7' sofort durch den iterativen Regelprozess kompensiert.

Verfahrbahn-Abschnitte B,B' (Annäherung der Montagewerkzeuge 5,5' an die Karosserie 1):

Ist die Fahrertür 3' gegenüber der Fondtür 3 ausgerichtet, so wird die dabei erreichte Relativausrichtung der beiden Roboter 7,7' als eine feste Bezugsgröße im Steuersystem 20 abgespeichert. Anschließend werden die beiden Roboter 7,7' rechnerisch aneinander angekoppelt und während der nun folgenden

Verfahrensschritte simultan zueinander bewegt. Um dies zu erreichen, enthält das Steuersystem 20 der Roboter 7,7' einen Controller mit drei Untersystemen:

- Das erste Untersystem enthält alle diejenigen Befehle, die die Funktionen des Fahrertür-Roboters 7' mit seinem Montagesystem 5' beschreiben (u.a. die Steuerung der Bahnen A-1',B',D' und der Greifaufgaben der Fixiervorrichtung 14 sowie die Regelung der Bahnen A-2',C'); es enthält weiterhin alle Befehle für den Fondtürroboter 7 mit seinem Montagesystem 5, die von den Funktionen des Fahrertürroboters 7' unabhängig sind (also u.a. die Steuerung der Bahnen A-1,D und der Greifaufgaben für die Fixiervorrichtung 14').
- Das zweite Untersystem enthält diejenigen Befehle, die Funktionen der Roboter 7,7' beschreiben, die vom ersten Untersystem regiert werden und bei denen der Fahrertür-Roboter 7' mit dem Fondtür-Roboter 7 zusammenwirkt; dies betrifft insbesondere die gekoppelt zu durchlaufenden Bahnabschnitte B/B' und C/C'.
- Das dritte Untersystem enthält nur Befehle zum Starten des ersten und des zweiten Untersystems und führt diese Befehle asynchron und simultan aus.

Bezüglich Details des Zusammenwirkens dieser Untersysteme wird auf die EP 752 633 A1 verwiesen. Bezüglich der Bahnabschnitte B/B' und C/C', in denen der Roboter 7 an den Roboter 7' angekoppelt ist, wird der Roboter 7' als der „Master“ und der Roboter 7 als der „Slave“ bezeichnet.

Zu Beginn des Verfahrbahn-Abschnitts B/B' wird seitens des dritten Untersystems ein Befehl abgesetzt, der das zweite Untersystem startet und somit den „Slave“-Roboter 7 an den „Master“-Roboter 7' ankoppelt. Anschließend wird der Fahrertür-Roboter 7' als „Master“ gesteuert von der Vorhalteposition 23' in die Näherungsposition 36' in der Nachbarschaft des Fahrer-Türausschnitts 2' der Karosserie 1 bewegt. Der Fondtür-Roboter 7 folgt ihm dabei als „Slave“ in die Näherungsposition 36, wobei die in Bahnabschnitt A-2' erreichte hochge-

naue Relativausrichtung der beiden Türen 3,3' erhalten bleibt.

Verfahrbahn-Abschnitte C,C' (Ausrichtung der Montagewerkzeuge 5,5' am Türausschnitt 2,2' der Karosserie 1):

Ausgehend von der Näherungsposition 36' wird das Montagewerkzeug 5' nun in die (während der Einlernphase eingelernte) Montageposition 27' gegenüber dem Türausschnitt 2' der Karosserie 1 gebracht. Diese Positionierphase verläuft analog zu der Positionierphase des Abschnitts A-2', im Zuge derer das Montagewerkzeug 5' gegenüber der Fondtür 3 positioniert wurde: Mit Hilfe der Sensoren 29' des Sensorsystems 28' werden Messwerte auf den Referenzflächen 9 der Karosserie 1 und/oder den Referenzbereichen 30,30' der Türen 3,3' aufgenommen, und aus diesen Messwerten wird mit Hilfe der in der Einrichphase II. bestimmten Jacobimatrix ein Bewegungsinkrement berechnet, um das das Montagewerkzeug 5' mit Hilfe des Roboters 7' verschoben wird. Da der Fondtür-Roboter 7 an den Fahrertür-Roboter 7 angekoppelt ist, folgt er diesen Verschiebungen des Montagewerkzeugs 5'. Der Mess- und Verschiebe-Vorgang wird iterativ so lange wiederholt, bis die Differenz zwischen den aktuellen (Ist-) und den angestrebten (Soll-) Sensormesswerten ein vorgegebenes Fehlermaß unterschreitet, oder bis sich diese Differenz nicht mehr über einen im Vorfeld festgesetzten Schwellenwert hinaus ändert. Die beiden Montagewerkzeuge 5,5' befinden sich dann in der (in Figur 1c dargestellten) Montageposition 27,27' gegenüber der Karosserie 1. In dieser Position werden die beiden Türen 3,3' an den Türausschnitten 2,2' befestigt. Hierfür können beispielsweise (in Figur 1c nicht gezeigte) Schrauber zum Einsatz kommen die an zusätzlichen Robotern oder Handlingssystemen befestigt sind.

Um die Montage der Türen 3,3' zu erleichtern, kann es zweckmäßig sein, die Türen 3,3' zwischenzeitlich aus dem Montagebereich 22 hinauszubewegen, um dort Platz zu schaffen für (in

den Figuren nicht gezeigte) Scharnierroboter, die Türscharniere in den Türausschnitten 2,2' befestigen. Hierzu wird die Fahrertür 3' mit Hilfe des Roboters 7' in eine Ausweichposition bewegt, in der der Montagebereich freigegeben wird. Nach erfolgter Scharniermontage wird die Fahrertür 3' zurück in die Montageposition 27' bewegt. Der angekoppelte Fondtür-Roboter 7 folgt dieser Bewegung, so dass die hochgenaue Ausrichtung der beiden Türen 3,3' bei diesen Auslagerungsbewegungen erhalten bleibt. - Bei der Scharniermontage kann die im Zuge des Positionierungsvorgangs aufgefundene, lagegenau zur Karosserie angeordnete Montageposition 27,27' als Referenzlage für alle an der Montage beteiligten weiteren Werkzeuge und Arbeitsschritte verwendet werden.

Nach dem Montieren der Türen 3,3' werden die Fixiervorrichtungen 14,14' der Montagewerkzeuge 5,5' gelöst, so dass die Türen 3,3' frei an der Karosserie 1 hängen. In dieser Lage können mit Hilfe der Sensoren 29 Kontrollmessungen der Fugenmaße, Spalte 31,31' und Tiefenmaße in den Bereichen 9,30,30' durchgeführt werden. Sollten dabei Abweichungen von den Sollmaßen festgestellt werden, so kann dem Bediener der Anlage eine definierte Information zur Nacharbeit zugesandt werden.

Verfahrbahn-Abschnitte D/D' (Rückzug der Montagewerkzeuge 5,5'):

Sind die Türen 3,3' in der richtigen Lage in den Türausschnitten 2,2' befestigt, so wird die „Master“-„Slave“-Kopplung der beiden Roboter 7,7' aufgehoben. Weiterhin werden die Fixiervorrichtungen 14,14' der Montagewerkzeuge 5,5' in einer solchen Weise aus den Eingriffpositionen herausgeschwenkt, dass die Montagewerkzeuge 5,5' kollisionsfrei robotergesteuert von der Montageposition 27,27' in die Rückzugsposition 34,34' zurückbewegt werden können. Die Karosserie 1 wird entspannt, ausgehoben und gefördert, und parallel dazu werden die Montagewerkzeuge 5,5' mit neuen Türen 3,3' be-

stückt, während eine neue Karosserie 1 dem Arbeitsraum 6 des Montagesystems 4 zugeführt wird.

Zur Datenkommunikation zwischen den unterschiedlichen Systemkomponenten (Auswerteeinheiten 26,32 der Sensorsysteme 18',28' und den Steuerungen der Roboter 7,7' im Steuersystem 20) wird im vorliegenden Ausführungsbeispiel vorteilhafterweise eine TCP/IP-Schnittstelle eingesetzt, die eine hohe Datenrate ermöglicht. Eine solche hohe Datenrate ist notwendig, um während der geregt zu durchlaufenden Positionierphasen A-2' und C/C' eine Regelung des Gesamtsystems (Sensorsysteme/Roboter) mit der Vielzahl der Einzelsensoren 19,29 im Interpolationstakt der Roboter 7,7' (typischerweise 12 Millisekunden) bewältigen zu können. Für Regelungsprobleme geringerer Komplexität - d.h. bei niedrigeren Anforderungen an die Genauigkeit und längeren Regelzeiten - kann die Regelung auch über eine konventionelle serielle Schnittstelle realisiert werden.

Als Sensoren 19',29' zur Erfassung der Ist-Lage der Türen 3,3' relativ zueinander und gegenüber dem Referenzbereich 9 auf der Karosserie 1 können neben den bisher beschriebenen Spaltsensoren beliebige optische Sensoren zum Einsatz kommen. Beispielsweise können flächenhaft messende CCD-Kameras als Sensoren 19',29' eingesetzt werden, mit Hilfe derer (in Kombination mit geeigneten Bildauswertungsalgorithmen) die Raumlagen und der gegenseitige Versatz von Kanten sowie räumliche Abstände etc. als Messgrößen generiert werden kann. Weiterhin können beliebige taktile und/oder berührungsfreie Messsysteme verwendet werden, wobei die Auswahl der geeigneten Sensoren stark vom jeweiligen Einsatzfall abhängt.

Im Ausführungsbeispiel der Figuren 1 bis 3 sind die Sensoren 19',29' der Sensorsysteme 18',28' ausschließlich auf dem Fahrertür-Montagewerkzeug 5' montiert. Stattdessen bzw. zusätzlich können (wie in Fig. 1a - 1c angedeutet) zur Messung auch Sensoren 19,29 verwendet werden, die auf dem Fondtür-

Montagewerkzeug 5 befestigt sind bzw. die Sensoren können zwischen den beiden Montagewerkzeugen 5,5' aufgeteilt sein. Insbesondere kann das Sensorsystem 28' auch Sensoren 29 umfassen, die fest mit dem Montagewerkzeug 5 verbunden sind: Da die beiden Montagewerkzeuge 5,5' in der Ausrichtphase C/C' fest miteinander gekoppelt sind, nehmen diese Sensoren 29 (innerhalb der in der Positionierphase erreichten Genauigkeit) eine bekannte Position gegenüber dem Montagewerkzeug 5' ein.

Das Verfahren ist neben der Türmontage auf die Montage beliebiger anderer (benachbarter) Anbauteile übertragbar, welche in hochgenauer Relativausrichtung an einem Werkstück montiert werden müssen. Unter „robotergeführten“ Werkzeugen sind im Zusammenhang der vorliegenden Anmeldung ganz allgemein Werkzeuge zu verstehen, die auf einem mehrachsigen Manipulator, insbesondere einem sechsachsigen Industrieroboter montiert sind.

.000.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Montage mehrerer Anbauteile (3,3') an ein Werkstück (1), insbesondere an eine Fahrzeugkarosserie, wobei die Anbauteile (3,3') lagegenau zueinander ausgerichtet an dem Werkstück (1) befestigt werden,
  - bei welchem Verfahren zur Zuführung und Positionierung jedes Anbauteils (3,3') ein mittels eines Roboters (7,7') geführtes Montagewerkzeug (5,5') verwendet wird, welches eine Fixiervorrichtung (14,14') zur Aufnahme des Anbauteils (3,3') umfasst,
  - und wobei mindestens eines der Montagewerkzeuge (5,5') ein fest mit dem Montagewerkzeug (5,5') verbundenes Sensorsystem (18,18') mit mindestens einem Sensor (19,19') umfasst,  
mit den folgenden Verfahrensschritten:
    - die Montagewerkzeuge (5,5') werden durch einen iterativen Regelvorgang (A-2') unter Zuhilfenahme von Messwerten der Sensoren (19,19') in eine Vorhalteposition (23,23') bewegt, in welcher die in den Montagewerkzeugen (5,5') gehaltenen Anbauteile (3,3') lagegenau zueinander ausgerichtet sind,
    - die Montagewerkzeuge (5,5') mit den darin gehaltenen, lagegenau zueinander ausgerichteten Anbauteilen (3,3'), werden von der Vorhalteposition (23,23') in eine Montageposition (27,27') gegenüber dem Werkstück (1) geführt, in der sie mit dem Werkstück (1) verbunden werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1 dadurch gekennzeichnet, dass im Rahmen des iterativen Regelvorgangs (A-2'), durch

den die Anbauteile (3,3') lagegenau zueinander ausgerichtet werden, in einer Regelschleife die folgenden Prozessschritte durchlaufen werden:

- es werden (Ist-) Messwerte der Sensoren (19,19') erzeugt,
- diese (Ist-) Messwerte werden mit im Rahmen einer Einrichtphase erzeugten (Soll-) Messwerten verglichen,
- aus der Differenz zwischen (Ist-) Messwerten und (Soll-) Messwerten wird unter Verwendung einer im Rahmen der Einrichtphase berechneten Jacobi-Matrix ein Verschiebungsvektor der Montagewerkzeuge (5,5') berechnet,
- die Montagewerkzeuge (5,5') werden um diesen Verschiebungsvektor verschoben.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass zum Anfahren der Montageposition (27,27') ein zweiter iterativer Regelprozess (C,C') durchlaufen wird, im Rahmen dessen die lagegenau zueinander ausgerichteten Anbauteile (3,3') unter Zuhilfenahme von Messwerten von Sensoren (29,29') lagegenau zu einem Referenzbereich (9) auf dem Werkstück (1) ausgerichtet werden.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass nach Erreichen der Vorhalteposition (23,23') die Bewegungen der Roboter (7,7') in einer solchen Weise gekoppelt werden, dass beim Anfahren der Montageposition (27,27') die lagegenaue Ausrichtung der Anbauteile (3,3') zueinander erhalten bleibt.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4

d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t , dass die Anbauteile (3,3') Fahrertür (3') und Fondtür (3) einer Fahrzeugkarosserie (1) sind, die lagegenau zueinander ausgerichtet und an Türausschnitten (2,2') der Karosserie (1) festgeschraubt werden.

6. Montagesystem (4) zur simultanen Montage mehrerer Anbauteile (3,3') an ein Werkstück (1), insbesondere zur Montage zweier benachbarter Fahrzeugtüren (3,3') an eine Fahrzeugkarosserie (1),
  - mit mehreren Robotern (7,7'), welche jeweils ein Montagewerkzeug (5,5') zur Aufnahme eines Anbauteils (3,3') tragen,
  - mit einem Steuersystem (20), das für jeden Roboter (7,7') ein Bearbeitungsprogramm zur Bahnsteuerung des Roboters (7,7') und zur Bewegungssteuerung des Montagewerkzeugs (5,5') aufweist,
  - mit einem Sensorsystem (18,18'), welches fest mit einem der Montagewerkzeuge (5,5') verbunden ist und einen oder mehrere Sensoren (19,19') umfasst,
    - wobei mindestens einer der Sensoren (19,19') auf einen Referenzbereich (11,11') des im anderen im Montagewerkzeug (5,5') gehaltenen Anbauteils (3,3') gerichtet ist,
  - und mit einer Auswerteeinheit (26) zur Auswertung der Messwerte des Sensorsystems (18,18').
7. Montagesystem nach Anspruch 6,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass mindestens einer der Sensoren (19,19') ein metrisch unkalibrierter Sensor ist.
8. Montagesystem nach Anspruch 6 oder 7,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass zur Kommunikation zwischen dem Steuersystem (20) des Roboters (7,7') und der Auswerteeinheit (26) des Sensorsystems (18,18') eine TCP/IP-Schnittstelle verwendet wird.